Corso di Laurea in LOGOPEDIA

FISICA ACUSTICA

MOTO OSCILLATORIO

Fabio Romanelli
Department of Mathematics & Geosciences
University of Trieste
Email: romanel@units.it

Oscillazione

Un'**oscillazione** è la variazione, tipicamente nel tempo, di qualche misura attorno a un valore centrale (spesso un punto di equilibrio) o tra due o più stati diversi.

Il termine **vibrazione** si usa in maniera più specifica per indicare un'oscillazione meccanica, anche se spesso viene usato come sinonimo di "oscillazion".

Fisica

Qualsiasi moto che si ripete dopo un intervallo di tempo

Ingegneria (sistemi meccanici)

Descrive la relazione tra le

forze e il **moto** oscillatorio dei corpi

Descrizione delle oscillazioni

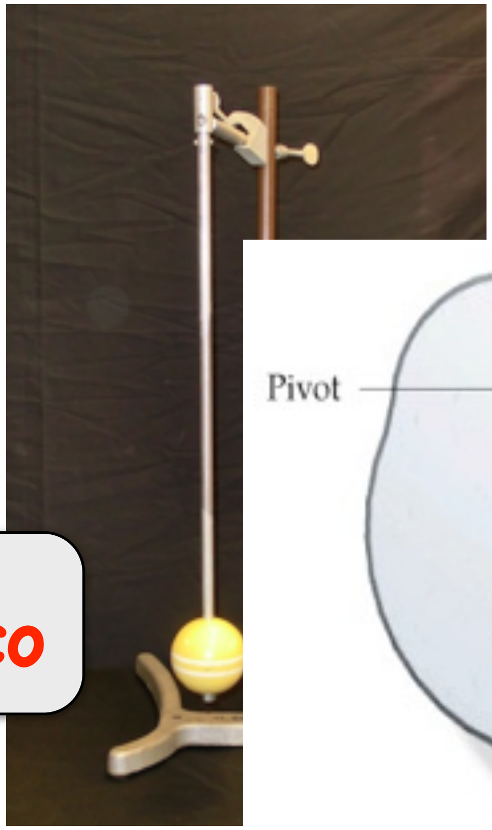
Sistema fisico

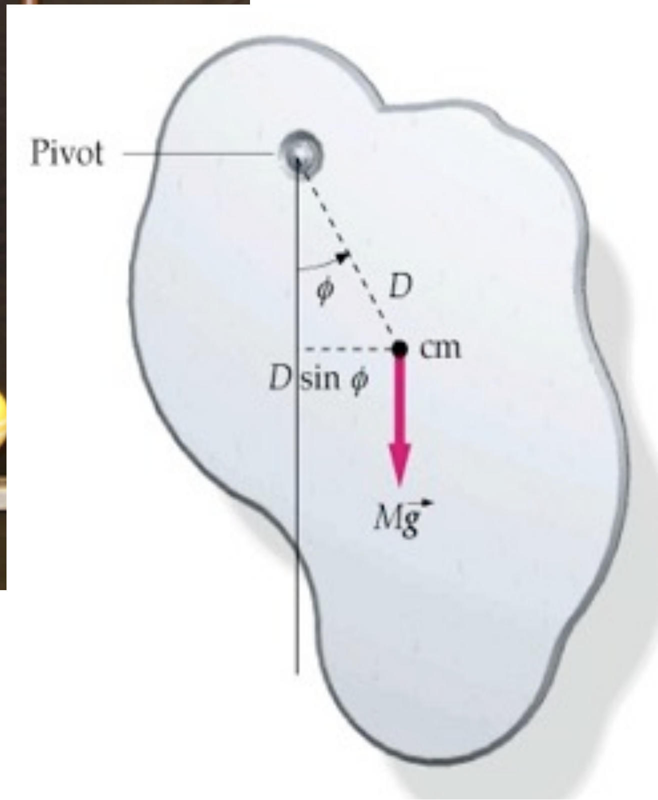
Descrizione delle oscillazioni

Physical system

Modello

Modello realistico





Descrizione delle oscillazioni

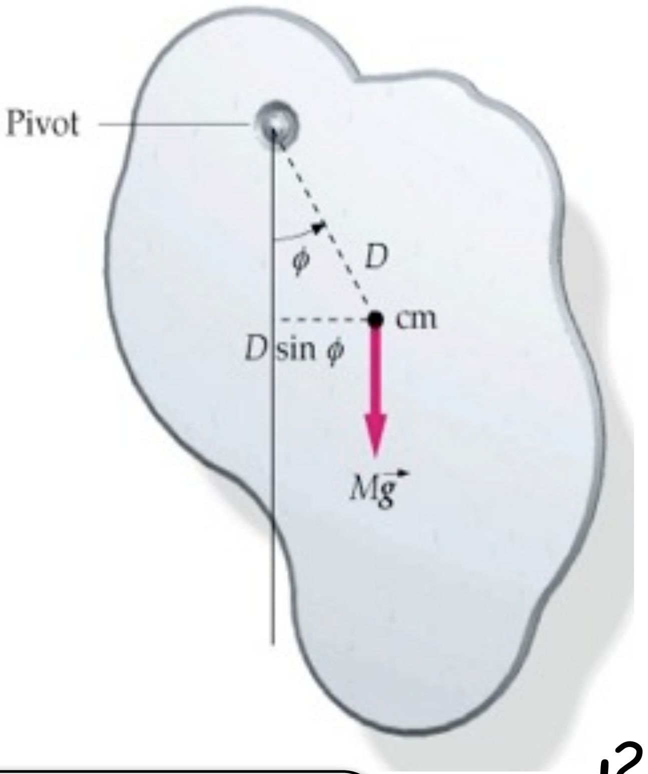
Sistema fisico

Modello

Modello realistico

Legge fisica

Modello matematico



$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{MgD}{I}\phi$$

Descrizione delle oscillazioni

Sistema fisico

Modellazione

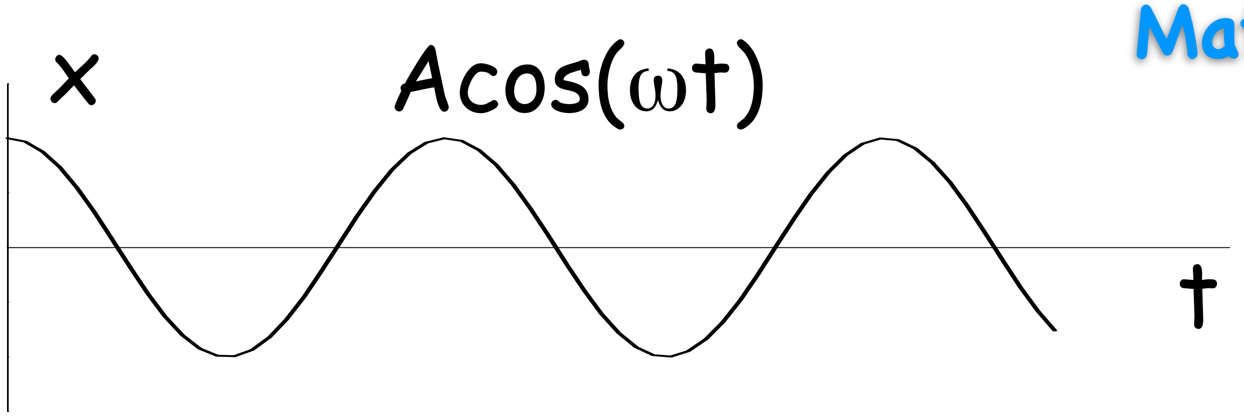
Modello realistico

Legge fisica

Modello matematico

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{MgD}{I}\phi$$

Matematica



Soluzione mat.

Moto oscillatorio (armonico)

Il moto di un oggetto può essere predetto se sono note le forze che agiscono su di esso.

Un caso speciale di moto avviene quando la forza agente è proporzionale allo spostamento dell'oggetto dalla posizione di equilibrio.

Se questa forza agisce sempre verso la posizione di equilibrio il moto avverrà sempre attorno a questa posizione (equilibrio stabile).

Questo caso è noto come moto **periodico** o **oscillatorio**.

Esempi di moti oscillatori

1. Pendolo
2. Massa attaccata a una molla
3. Vibrazioni di uno strumento a corde

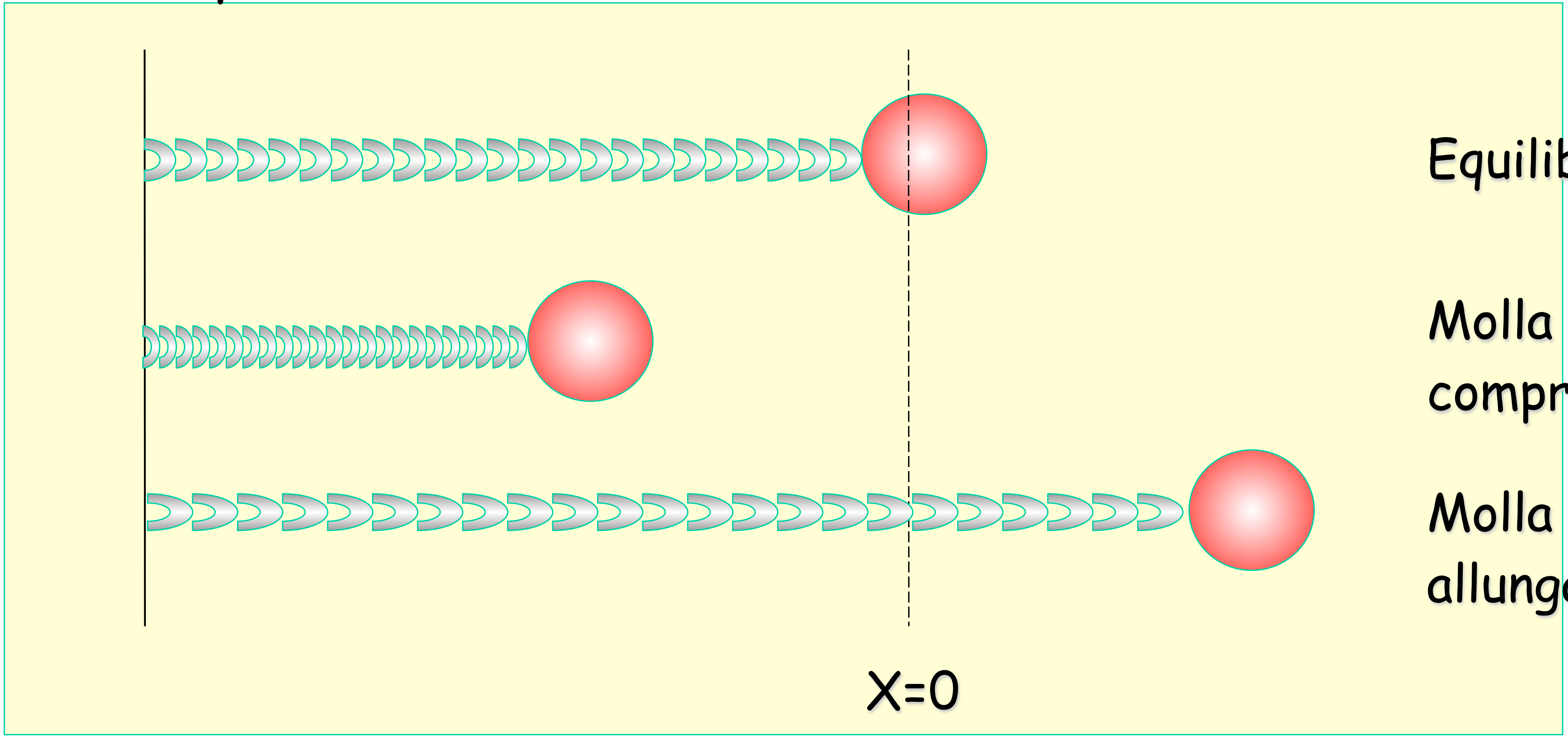
Altri esempi

1. Molecole d'aria in un'onda sonora armonica
2. Molecole in un solido
3. Corrente elettrica alternata

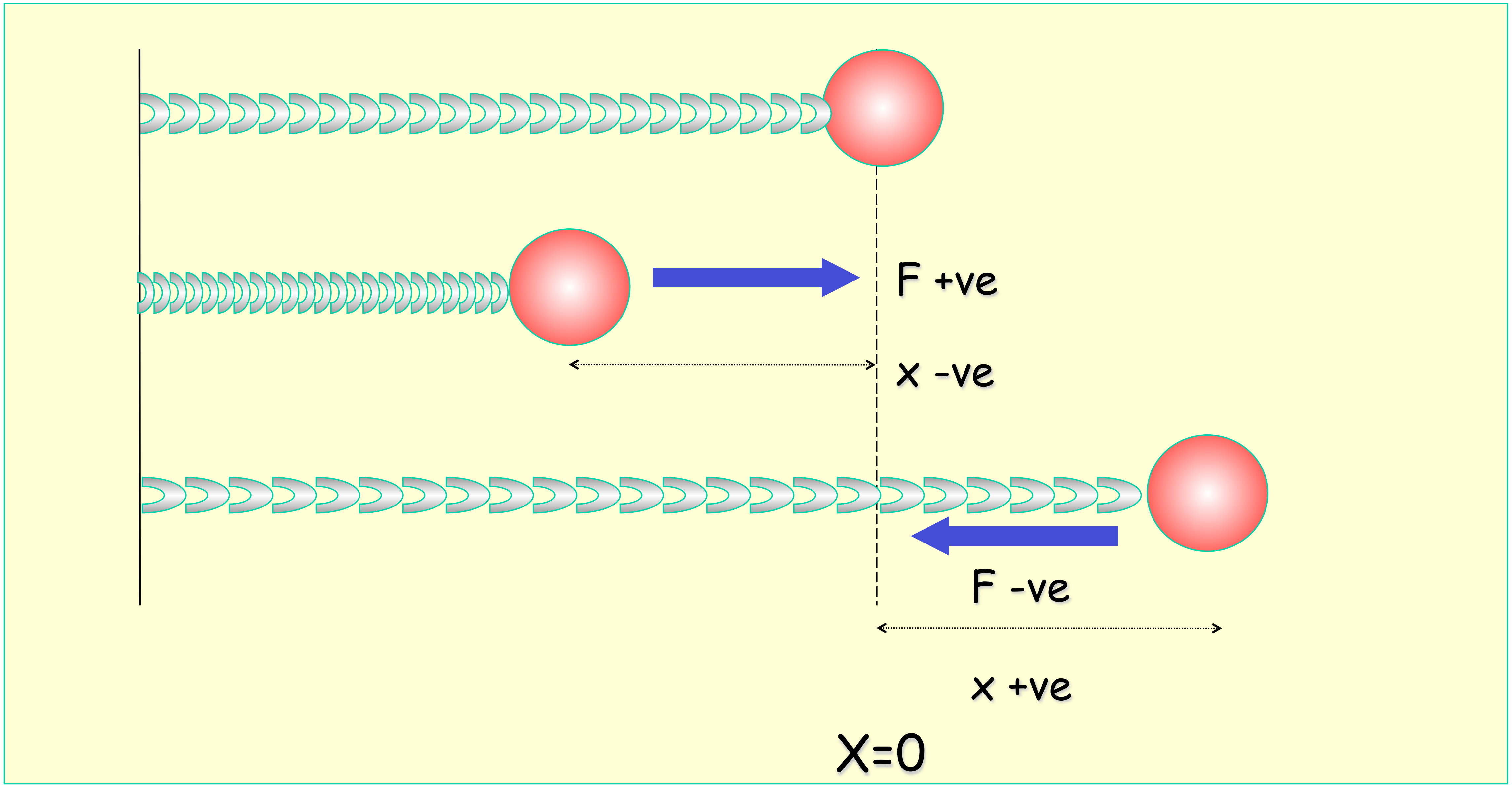
Moto Armonico Semplice (SHM)

Se un oggetto oscilla tra due posizioni per un indefinito periodo di tempo senza perdite di energia meccanica il moto è detto **simple harmonic motion (SHM)** o **moto armonico semplice**.

Esempio: massa su di una molla.



Legge di Hooke



La molla esercita una forza sulla massa per ripristinare la condizione iniziale di equilibrio

$F \propto -x$ o $F = -k\,x$ (**Legge di Hooke**)

dove k è una costante positiva (+ve), la **costante della molla**

Equazione del MOS

Dalla 2a legge di Newton:

F=ma

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$-kx = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\boxed{\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0}$$

Questa è la condizione per il moto oscillatorio semplice

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

Un oggetto si muove con moto oscillatorio armonico semplice (SHM) quando l'accelerazione è proporzionale all'opposto dello spostamento.

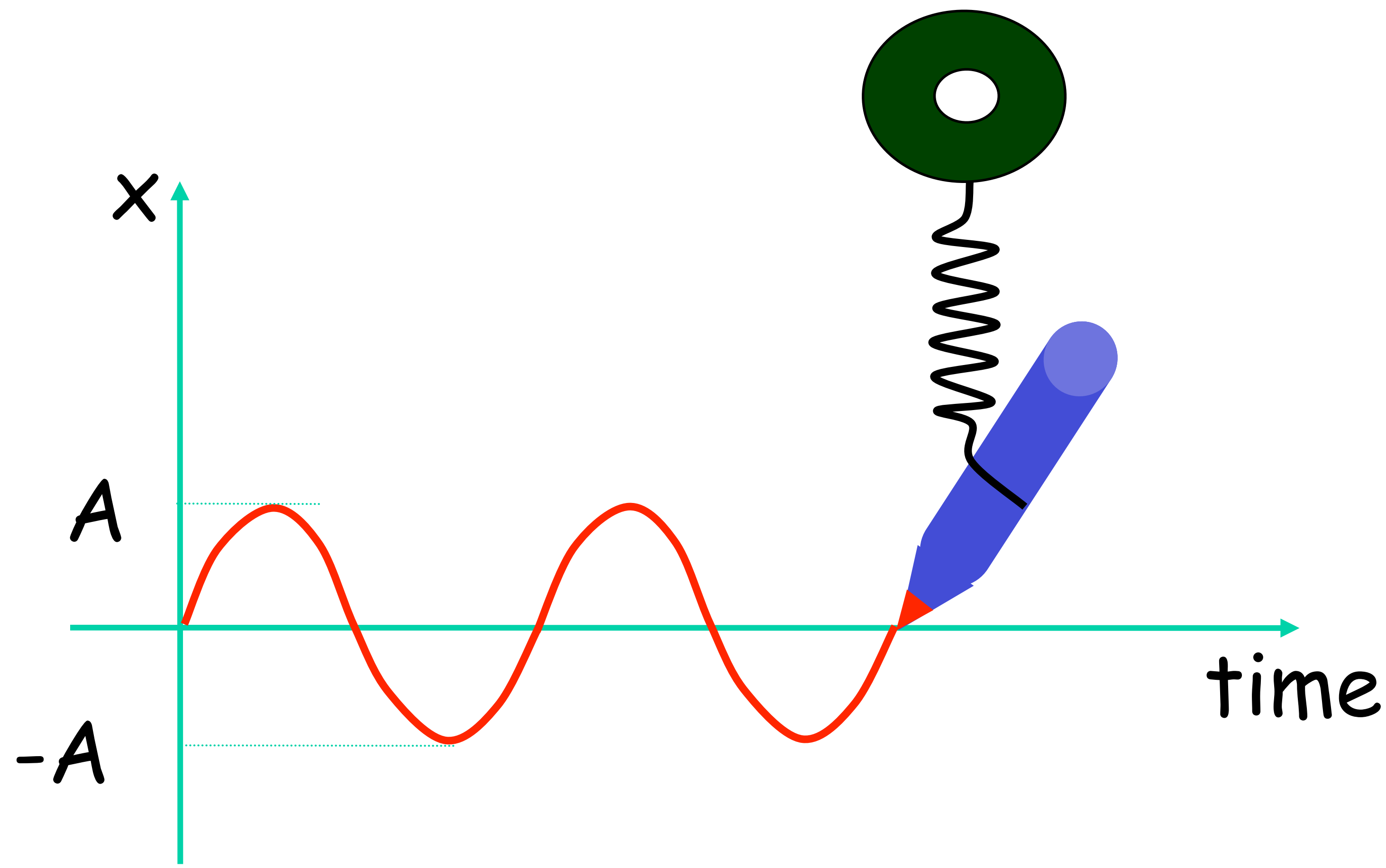
Alcune definizioni:

Il tempo impiegato per compiere un'oscillazione completa è il **periodo T**.

La **frequenza di oscillazione, f** = 1/T in s^{-1} o Hertz

La distanza dall'equilibrio allo spostamento massimo è l'**ampiezza di oscillazione, A**.

Si consideri:



L'equazione generale per il moto descritto dalla penna è $x = A \cos(\omega t + \delta)$

dove $(\omega t + \delta)$ è la **fase** del moto

e δ è la **costante di fase**

Si può dimostrare che $x = A\cos(\omega t + \delta)$

è una soluzione di $\dfrac{d^2x}{dt^2} = -\dfrac{k}{m}x$ differenziando:

$$x = A\cos(\omega t + \delta)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega\sin(\omega t + \delta)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2\cos(\omega t + \delta)$$

$$a = -\omega^2 x$$

Confrontando con $a = -(k/m)x$

$x = A\cos(\omega t + \delta)$ è una soluzione se $\omega = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$

Si può determinare l'ampiezza di oscillazione (A) e la costante di fase (δ) dalla posizione (x_o) e velocità (v_o) iniziali

$$\text{se} \quad x = A\cos(\omega t + \delta) \quad \text{allora} \quad x_o = A\cos(\delta)$$

$$\text{se } v = -A\omega\sin(\omega t + \delta) \quad \text{allora} \quad v_o = -A\omega\sin(\delta)$$

Il sistema ripete le oscillazioni ogni T secondi

perciò $\quad x(t) = x(t+T)$

e
$$A\cos(\omega t + \delta) = A\cos(\omega(t + T) + \delta)$$
$$= A\cos(\omega t + \delta + \omega T)$$

La funzione si ripete ogni T se $\omega T = 2\pi$

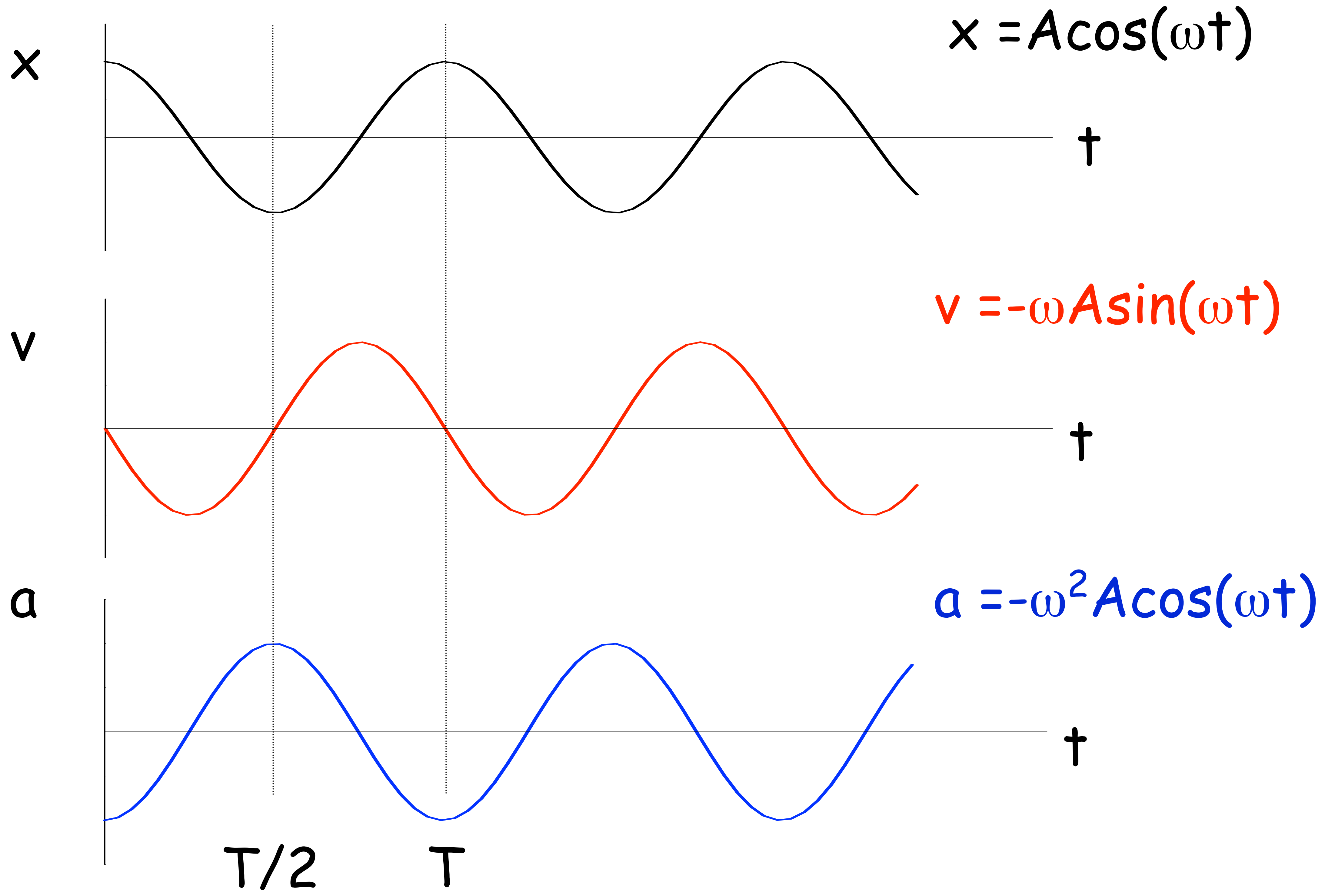
Possiamo legare ω, f e la costante della molla k usando le seguenti espressioni

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

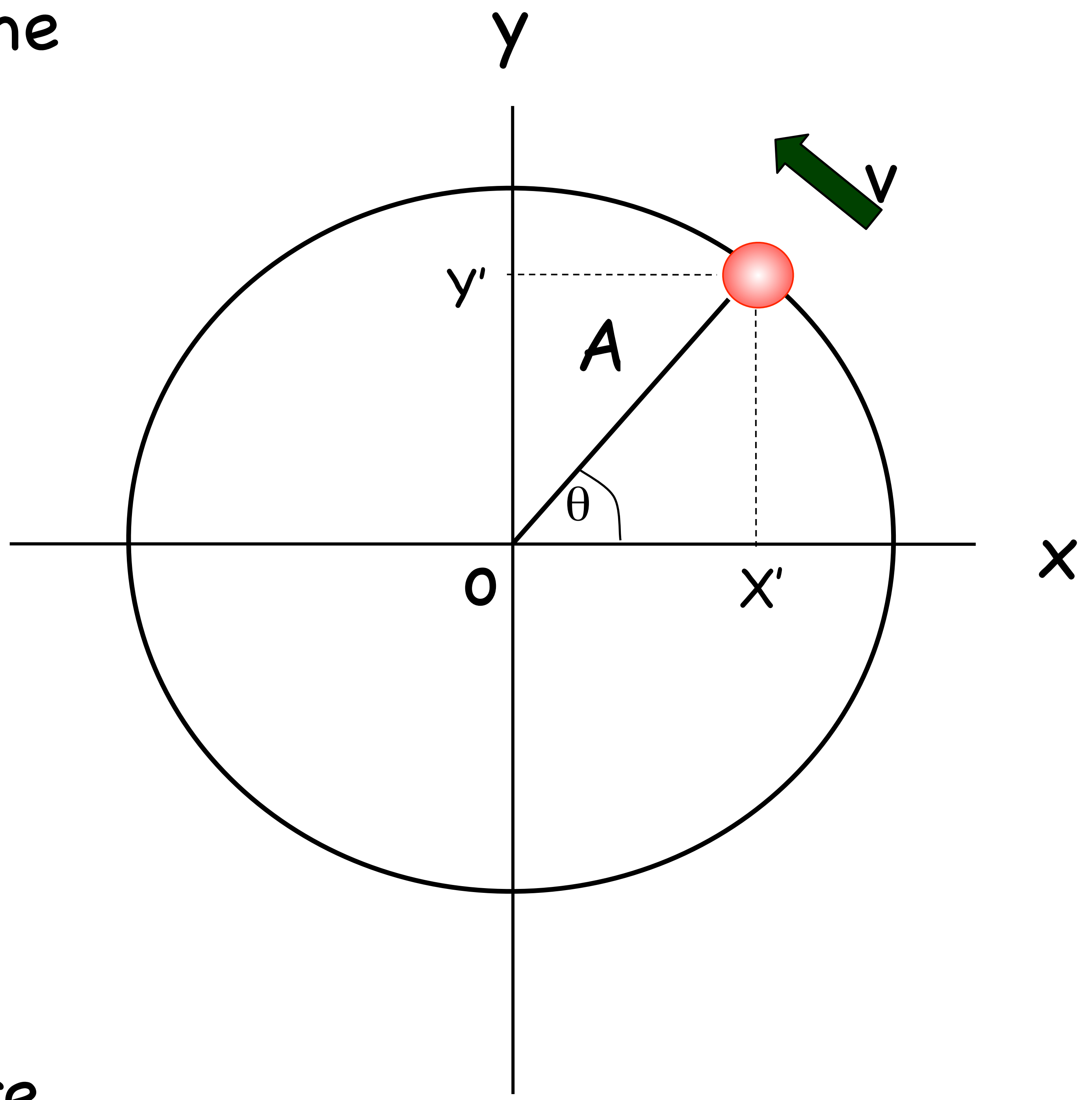
ω è nota come frequenza angolare e la sua unità di misura è rad s^{-1}

Andamento temporale



SHM e moto circolare

Si immagini una particella che si muova con velocità v costante su di un cerchio di raggio A



Lo spostamento angolare della particella rispetto all'asse x è dato da

$$\theta = \omega t + \delta$$

Dove δ = spostamento a t=0

e ω = v/A = velocità angolare

x funzione del tempo

$$x' = A\cos(\theta)$$

$$= A\cos(\omega t + \delta)$$

y funzione del tempo

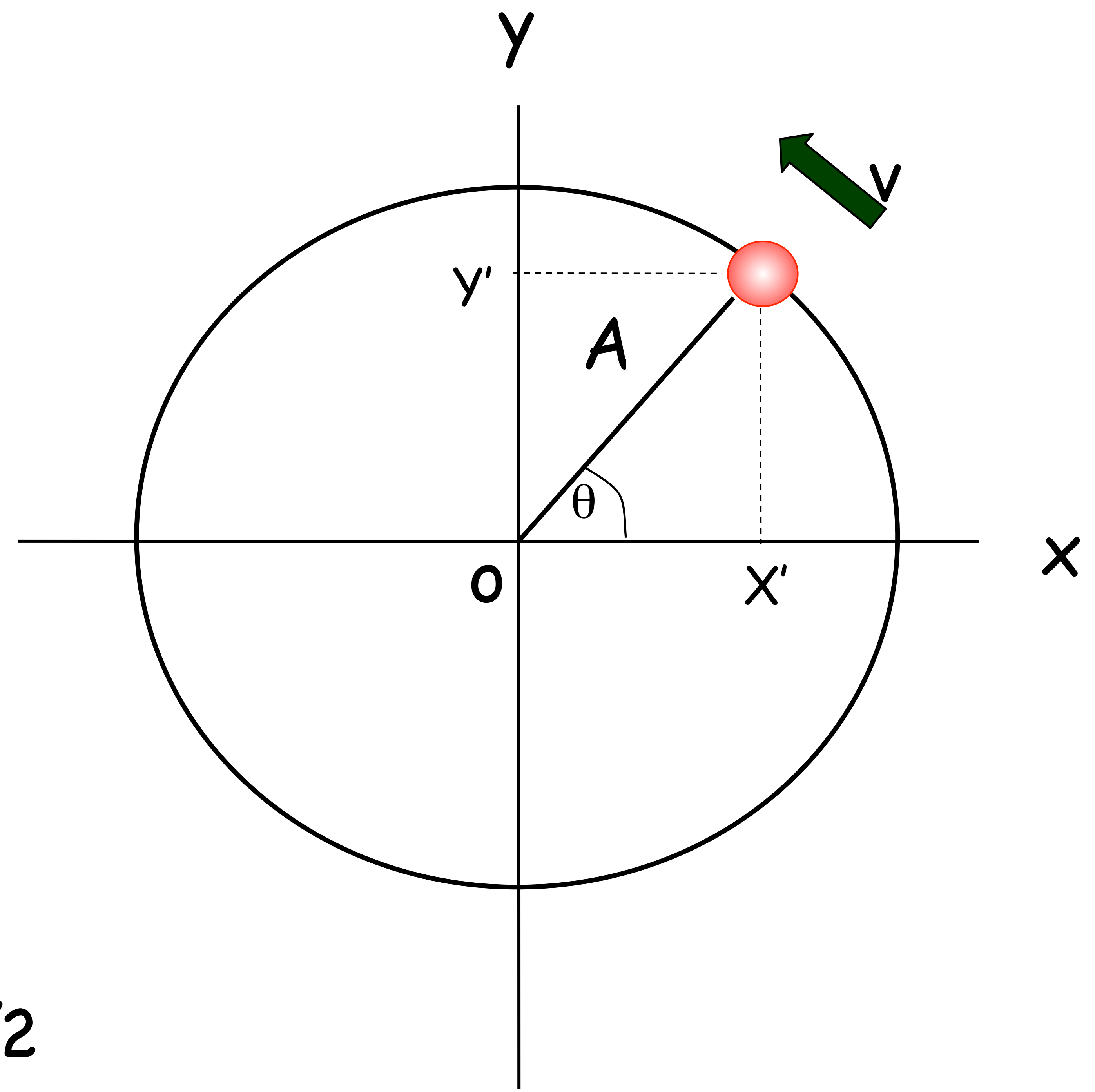
$$y' = A\sin(\theta)$$

$$= A\sin(\omega t + \delta)$$

$$= A\cos(\omega t + \delta - \pi/2)$$

Sia x che y descrivono SHM

Ma differiscono in fase di $\pi/2$



Quando una particella si muove con velocità costante su di un cerchio la sua proiezione sul diametro si muove con SHM.

Questo è vero sia per x che y

Il moto circolare è perciò la combinazione di due moti SHM perpendicolari, con la stessa ampiezza e frequenza ma con una differenza di fase relativa di $\pi/2$

Esempio

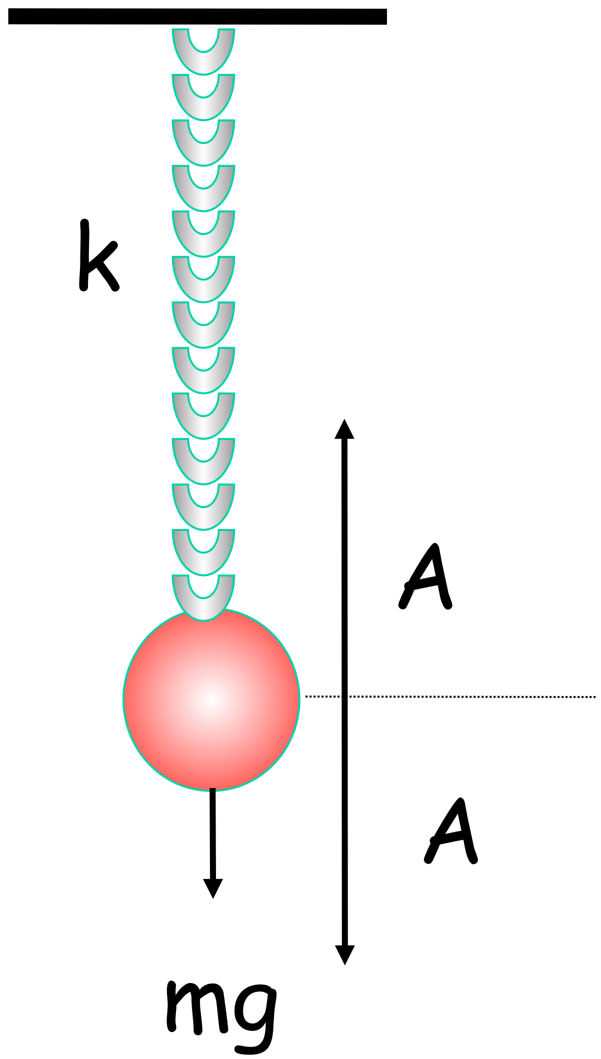
Una massa di 0.1 kg è sospesa ad una molla di massa trascurabile con costante elastica di $40 Nm^{-1}$. La massa oscilla verticalmente con ampiezza di 0.06m.

(a) Determinare la frequenza angolare del moto

(b) Si esprima l'altezza y della massa rispetto alla posizione di equilibrio come funzione del tempo, se a t=0 la massa è al punto più alto.

(c) Si esprima l'altezza y della massa rispetto alla posizione di equilibrio come funzione del tempo, se a t=0 la massa è 0.03m sopra la posizione di equilibrio e si muove verso il basso .

(a) Determinare la frequenza angolare del moto



$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{40}{0.10}}$$

$$= 20\,\mathrm{rad.s^{-1}}$$

$A = 0.06\mathrm{m}$

$k = 40\mathrm{N.m^{-1}}$

$m = 0.10\mathrm{kg}$

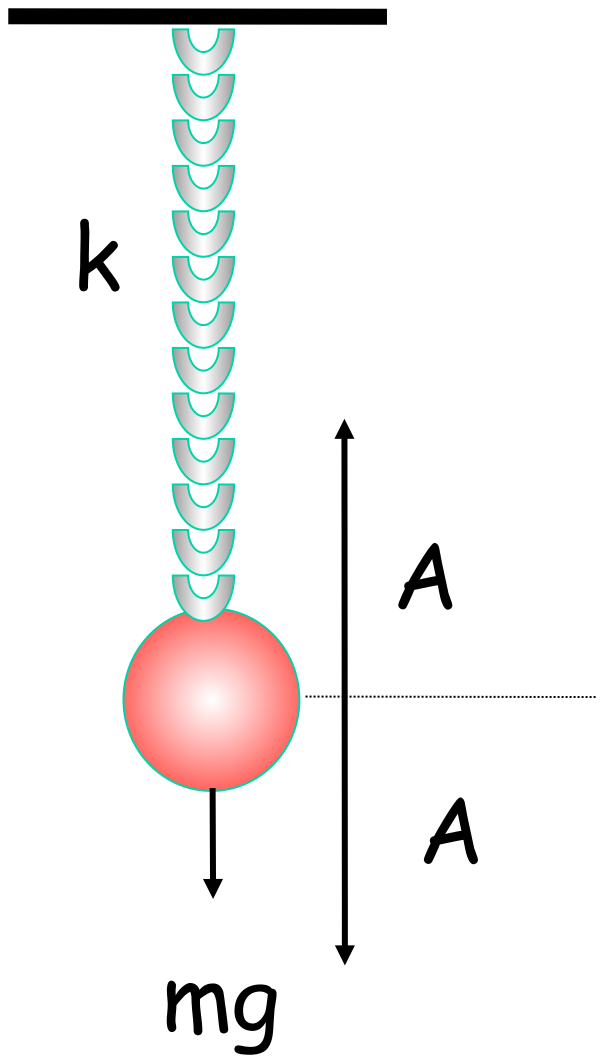
(b) Determinare y(t) se y(0)=A

In SHM

$$\text{posizione } y(t) = A\cos(\omega t + \delta)$$

$$\text{velocità } v(t) = -A\omega\sin(\omega t + \delta)$$

Condizioni iniziali: t=0 y(0)=A v=0



$$0.06 = 0.06\cos(0 + \delta)$$

$$0 = -20 \times 0.06\sin(0 + \delta)$$

$$\cos(\delta) = 1 \qquad \sin(\delta) = 0$$

Vero solo se $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi$.....

Se $\delta = 0$

$$\boxed{y(t) = 0.06\cos(20t)}$$

$A = 0.06\text{m}$

$k = 40\text{Nm}^{-1}$

$m = 0.10\text{kg}$

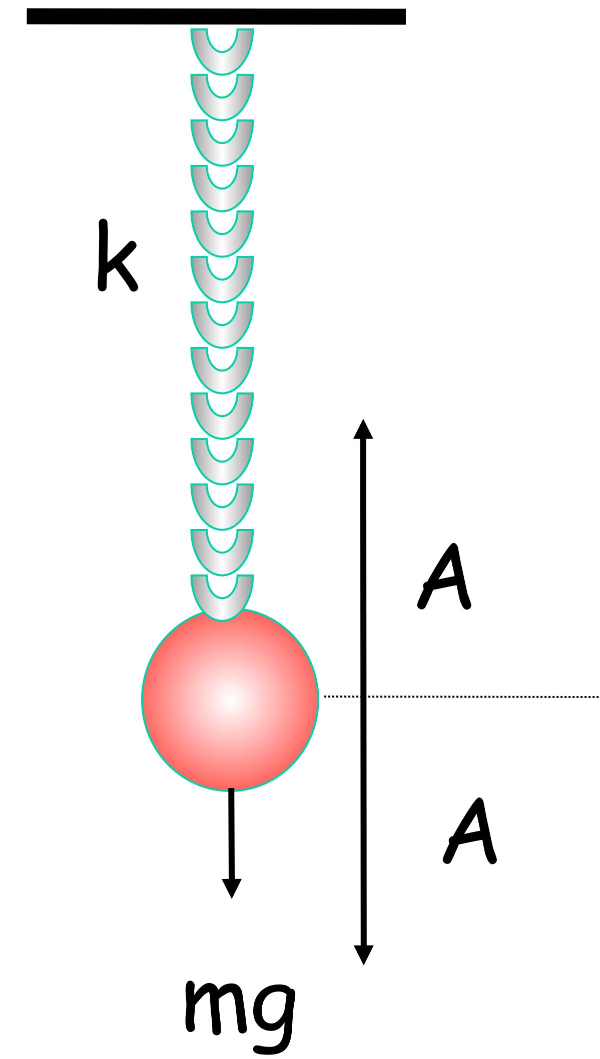
(c) Determinare y(t) se y(0)=0.03

In SHM

$$\text{posizione } y(t) = A\cos(\omega t + \delta)$$

$$\text{velocità } v(t) = -A\omega\sin(\omega t + \delta)$$

Condizioni iniziali: t=0 y(0)=0.03 v=-ve



$$0.03 = 0.06\cos(\delta)$$

$$0 > -20 \times 0.06\,\sin(\delta)$$

$\cos(\delta) = 0.5$ $\sin(\delta) > 0$

Vero solo se δ = π/3, 5π/3 ... o se 0 < δ < π

δ = π/3

$$\boxed{y(t) = 0.06\cos(20t + \pi/3)}$$

A = 0.06m

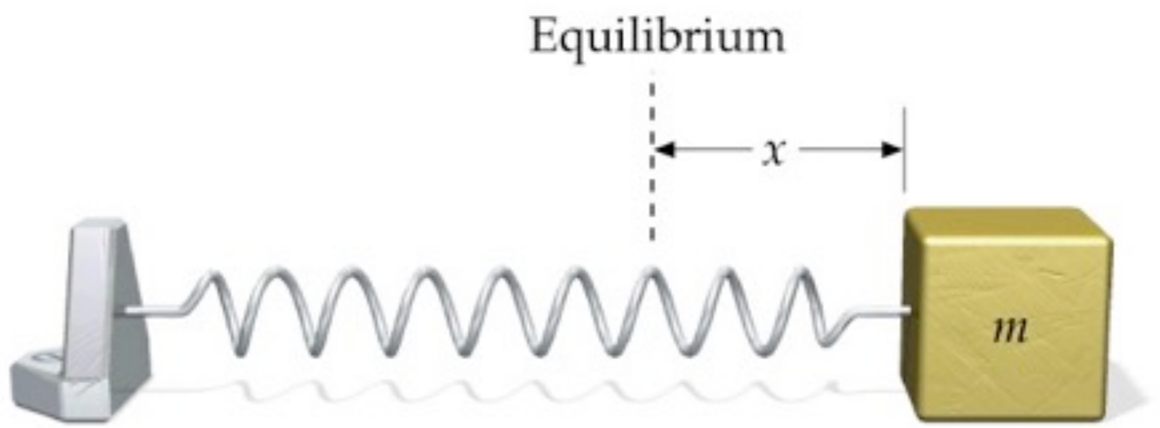
k = 40N.m^{-1}

m = 0.10kg

Energia

Nel SHM l'energia totale (E) di un sistema è **costante** ma l'energia cinetica (K) e quella potenziale (U) variano (t).

Si consideri una massa a distanza x dall' equilibrio e su cui agisca una forza di richiamo



Energia Cinetica

$$K = \tfrac{1}{2} m v^2$$

$$v = -A\omega \sin(\omega t + \delta)$$

$$K = \tfrac{1}{2} m A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t + \delta)$$

Sostituendo $\omega^2 = k/m$

$$K = \tfrac{1}{2} k A^2 \sin^2(\omega t + \delta)$$

Energia Potenziale

$$U = \tfrac{1}{2} k x^2$$

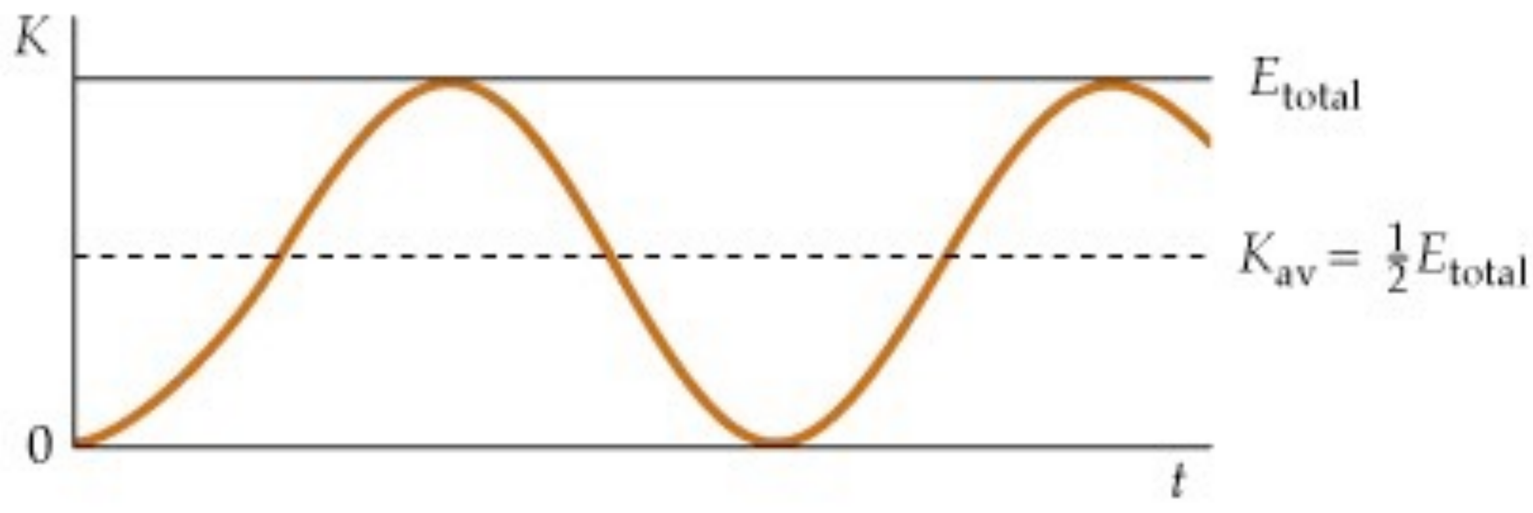
$$x = A\cos(\omega t + \delta)$$

$$U = \tfrac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega t + \delta)$$

Rappresentazione grafica

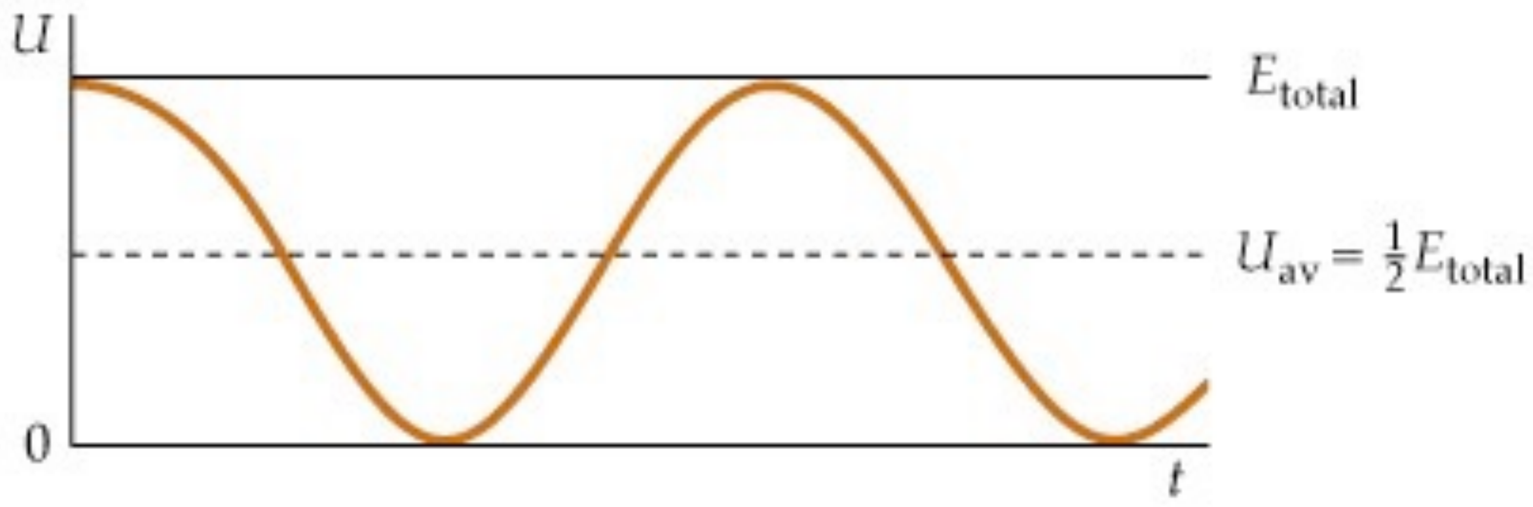
Energia

Cinetica



Energia

Potenziale



Energia totale

Energia totale E = K + U

$$= \tfrac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t+\delta) + \tfrac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t+\delta)$$

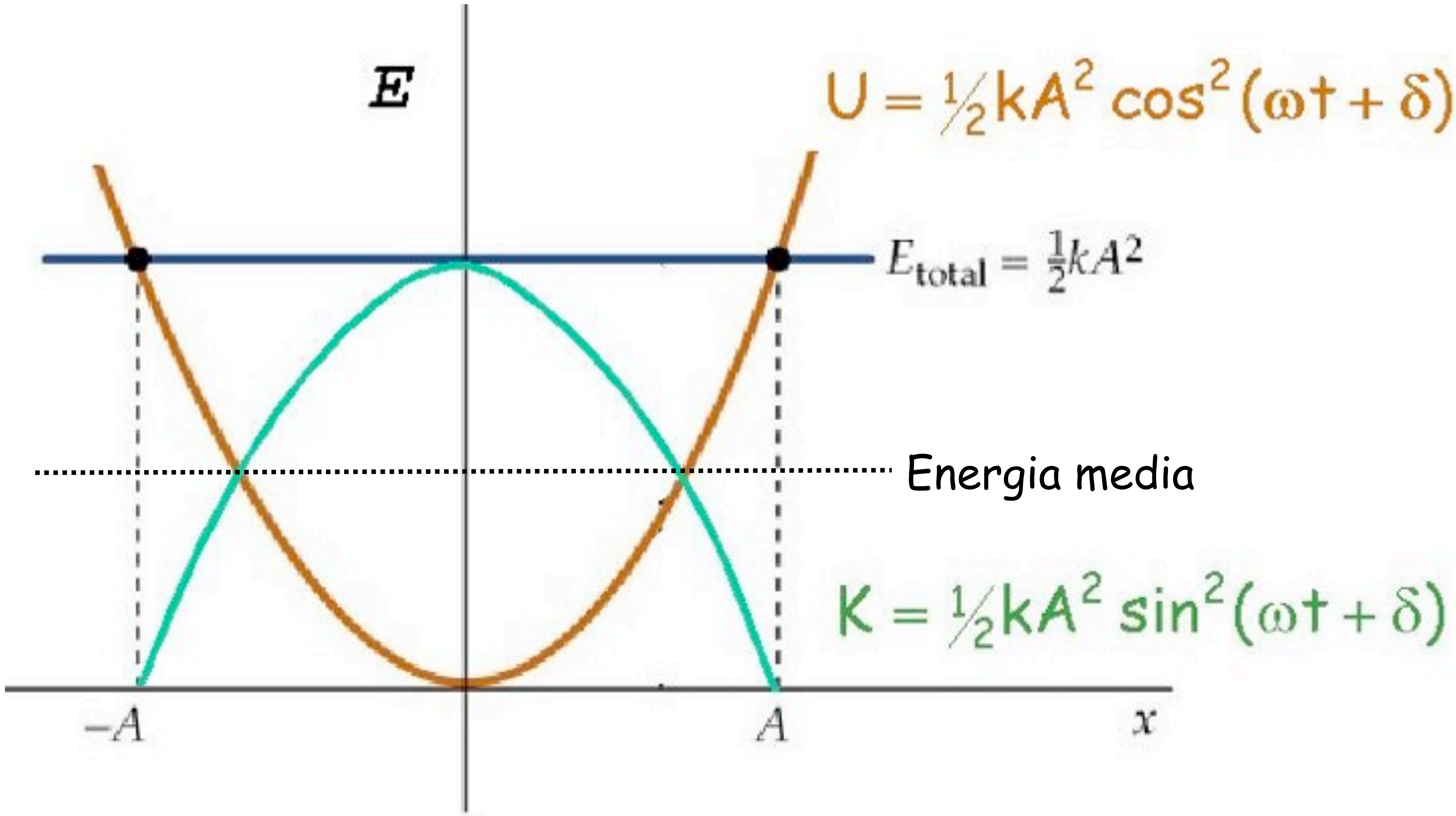
$$= \tfrac{1}{2}kA^2\left(\sin^2(\omega t+\delta) + \cos^2(\omega t+\delta)\right)$$

ma $\left(\sin^2(\omega t+\delta) + \cos^2(\omega t+\delta)\right) = 1$

$$\boxed{\therefore \quad E = \tfrac{1}{2}kA^2}$$

Nel SHM l'energia totale del sistema è proporzionale al quadrato dell'ampiezza del moto!

Rappresentazione grafica



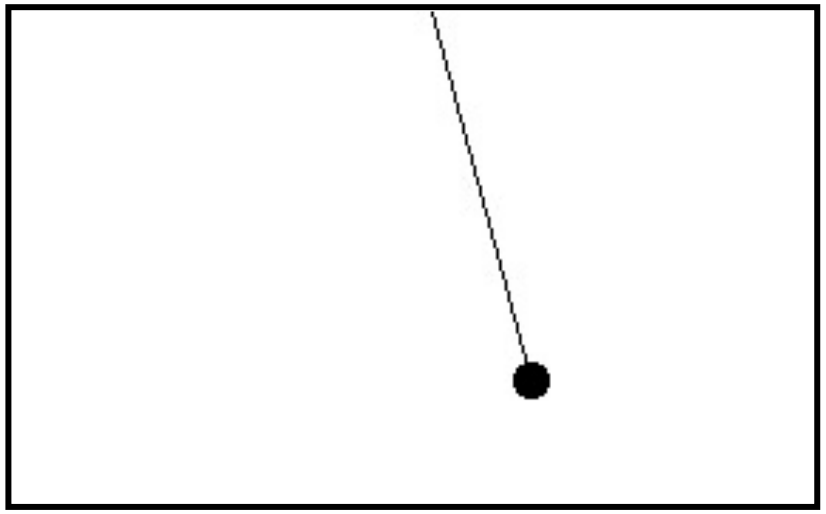
Al massimo spostamento K=0 $\therefore$ E = U

All' equilibrio U=0 e $v = v_{max}$ $\therefore$ E = K

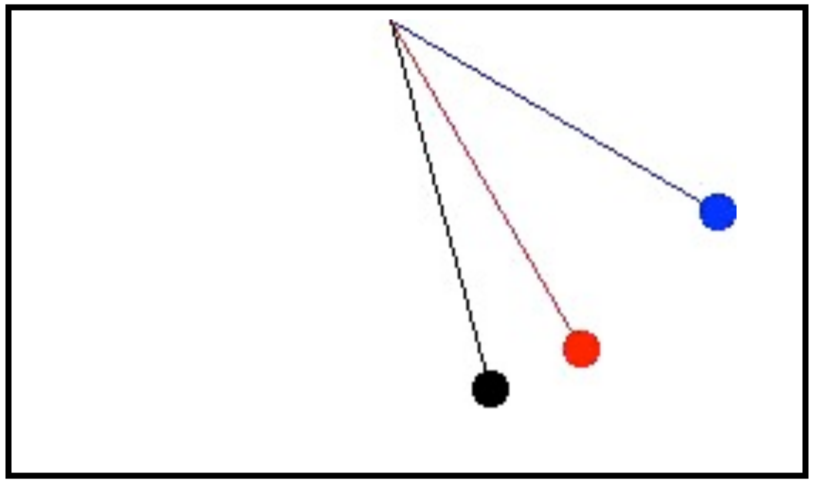
Ad ogni istante E = K + U è costante

Il pendolo semplice

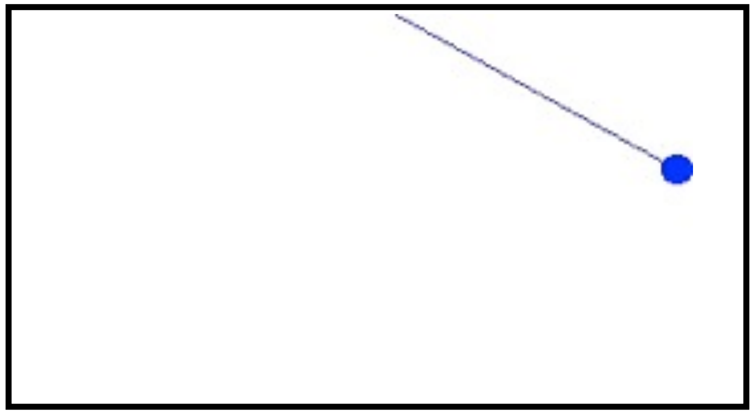
Un pendolo consiste di una corda di lunghezza L con una massa appesa m.



Quando la massa viene spostata e lasciata da un angolo iniziale φ rispetto alla verticale oscillerà con periodo T.



Deriveremo un espressione per T.



Forze sulla massa:

mg (verso il basso)

tensione (verso l'alto)

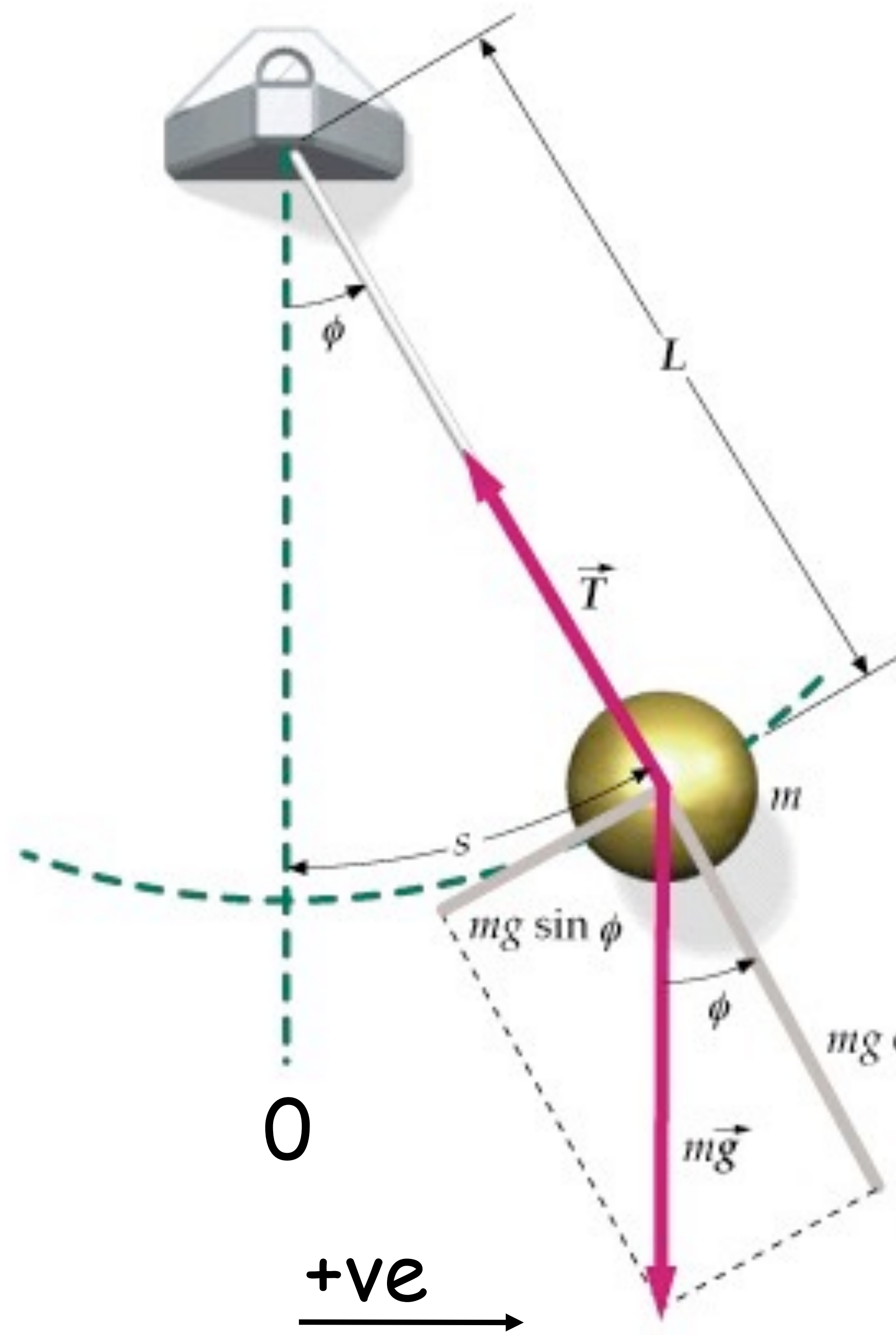
Quando la massa è ad un angolo φ rispetto alla verticale, vanno considerate queste forze:

Tangenzialmente:

peso = mg sin ϕ (verso 0)

tensione = T cos 90 = 0

$$\sum F_{tang} = -mg\sin\phi$$



Per $$\frac{\phi(\text{rads})}{2\pi} = \frac{s}{2\pi L}$$

si trova $$s = L\varphi$$

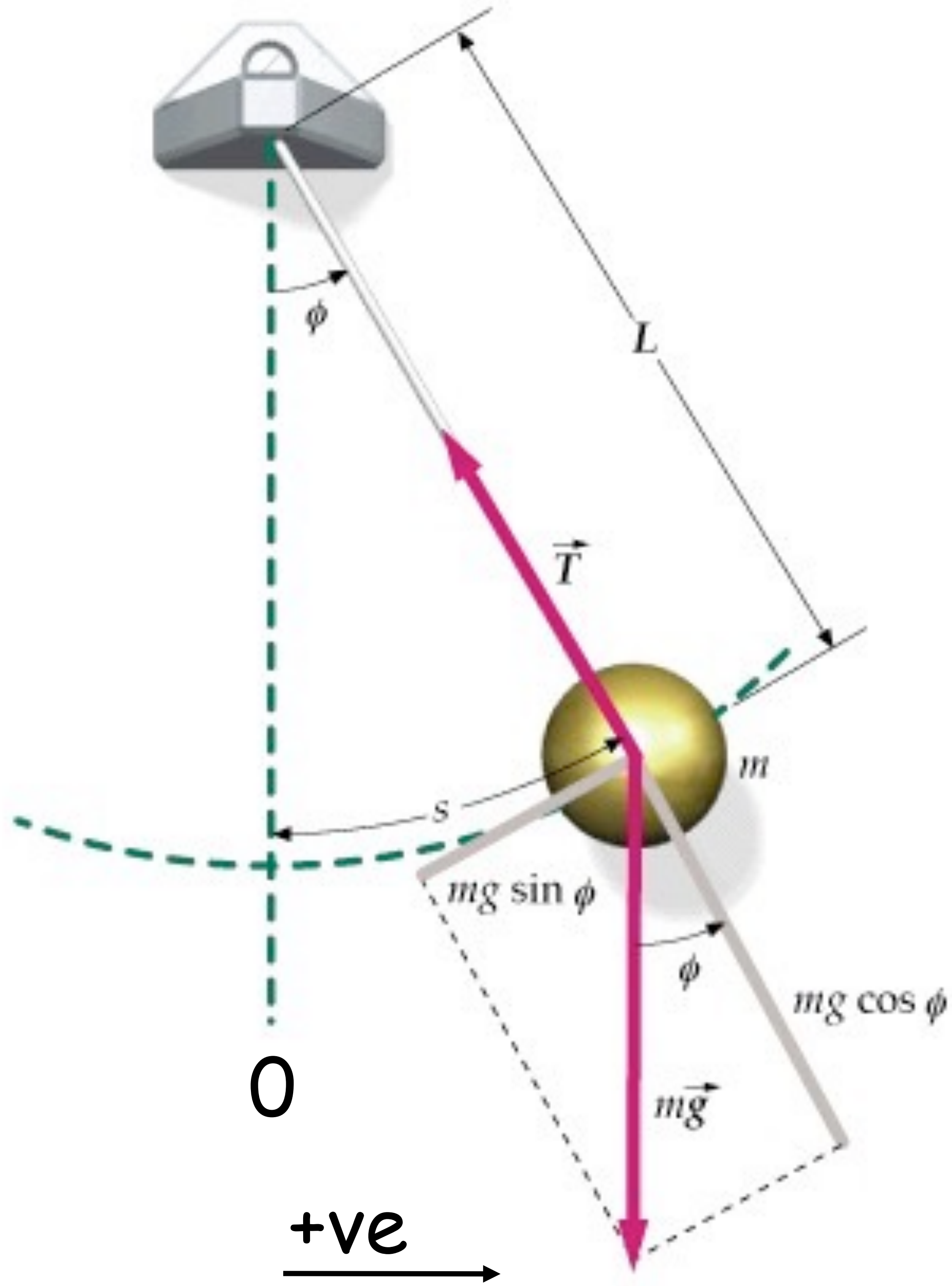
Dalla 2a legge di Newton (N2)

$$\sum F_{tang} = -mg\sin\phi$$

$$= ma$$

$$= m\frac{d^2s}{dt^2}$$

$$= mL\frac{d^2\phi}{dt^2}$$



$$-mg\sin\phi = mL\frac{d^2\phi}{dt^2}$$

o $$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{g}{L}\sin\phi$$

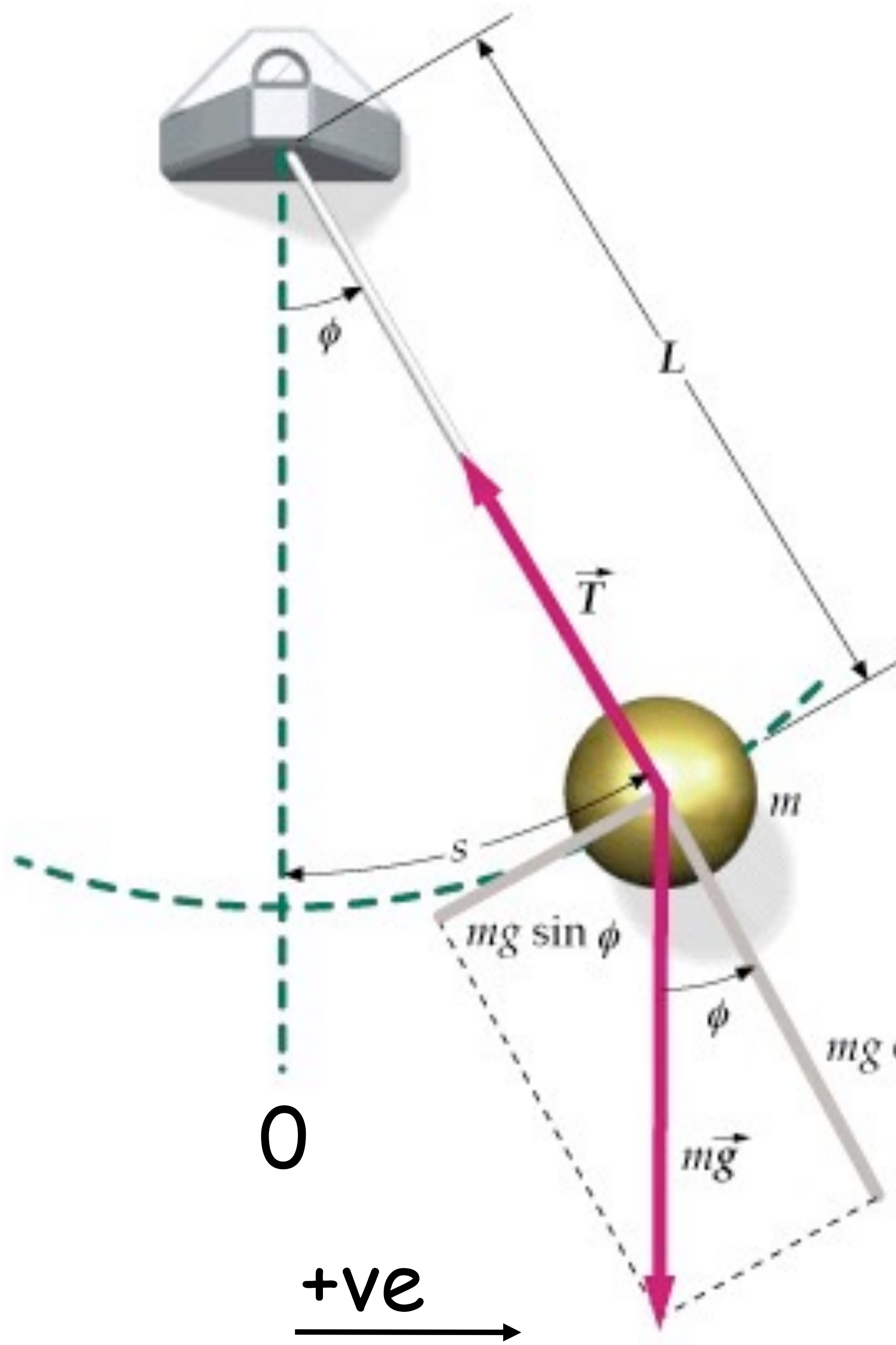
Per piccoli ϕ $\sin\phi \sim \phi$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{g}{L}\phi$$

i.e. SHM con $\omega^2 = \frac{g}{L}$

che ha soluzione

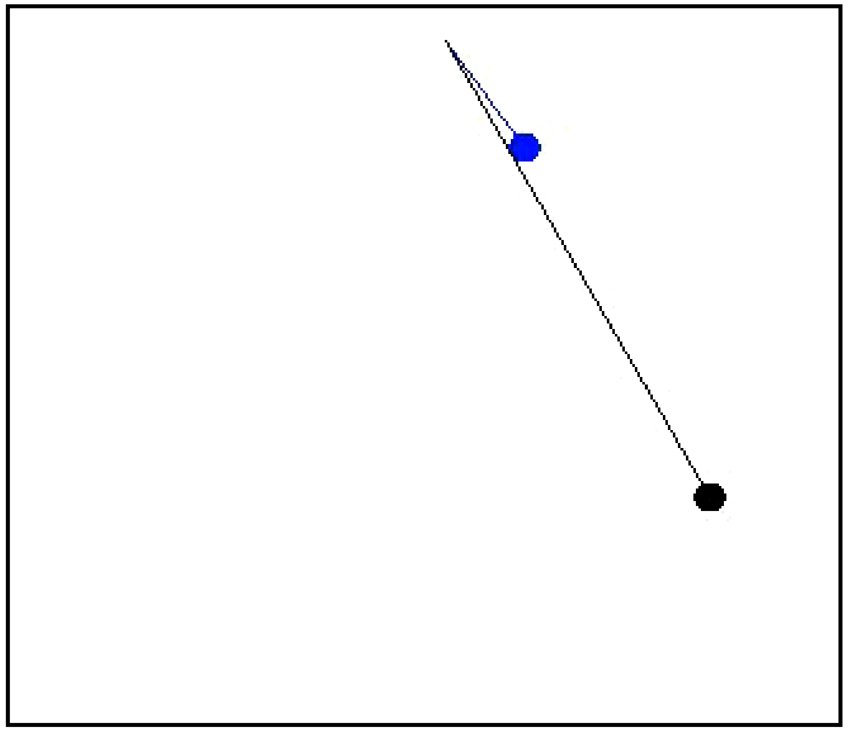
$$\phi = \phi_o \cos(\omega t + \delta)$$



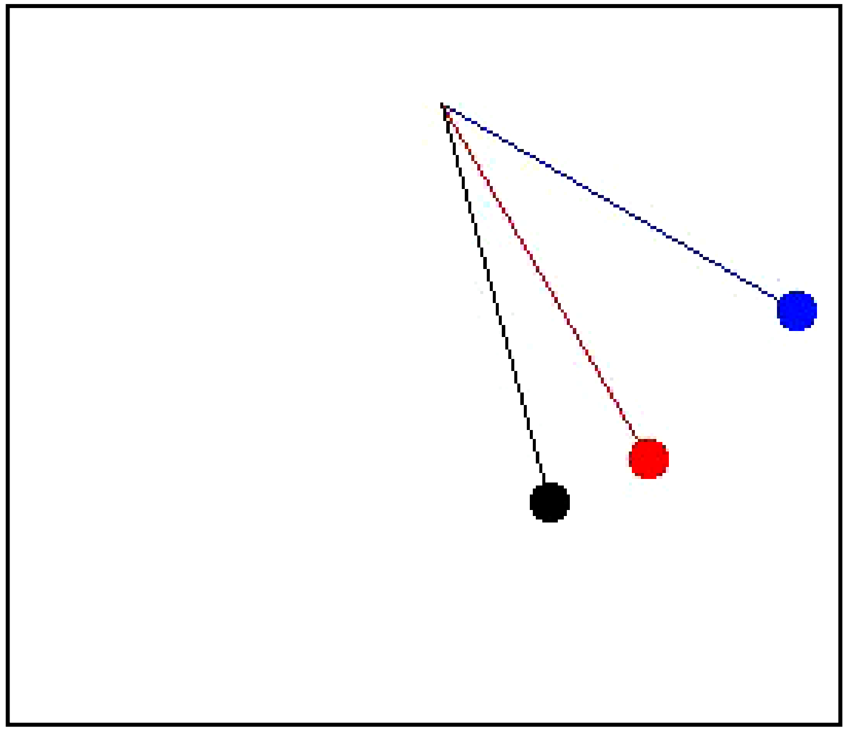
Periodo del moto

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

i.e. più lungo è il pendolo maggiore è il suo periodo



Nota: T non dipende dall'ampiezza di oscillazione, anche se un orologio a pendolo cambia ampiezza con il tempo (smorzamento)

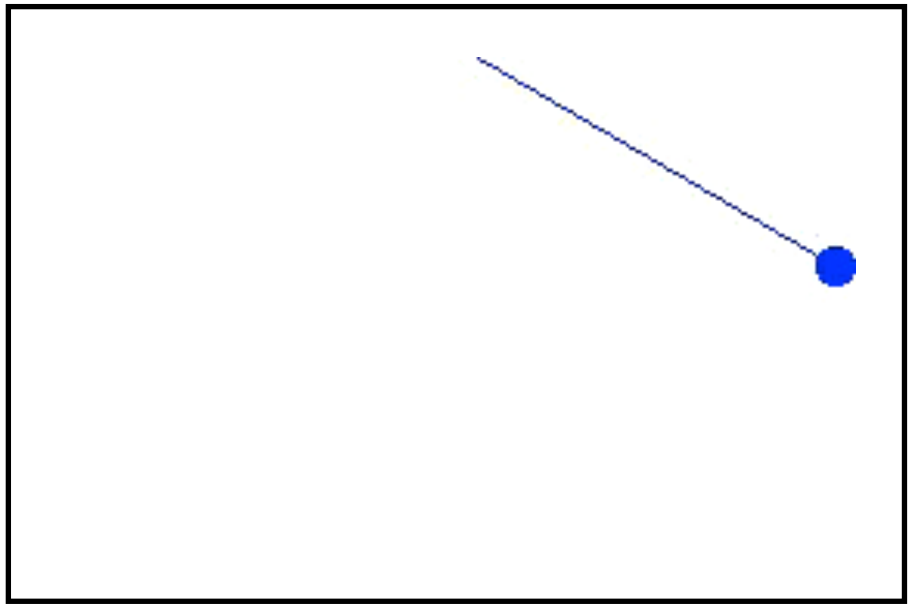


Se lo spostamento angolare iniziale è grande l'approssimazione lineare, per piccoli angoli, non è più valida

L' errore tra il moto armonico semplice e la soluzione vera appare immediatamente e cresce con il tempo .

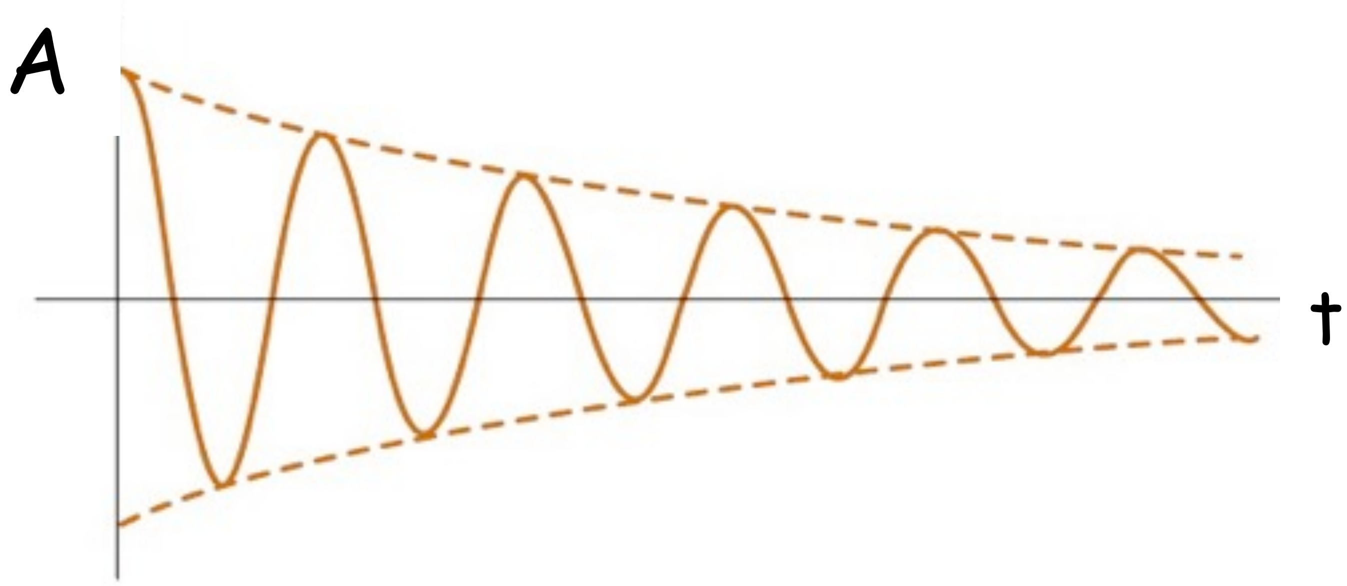
Pendolo blu scuro rappresenta l'approssimazione: $$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

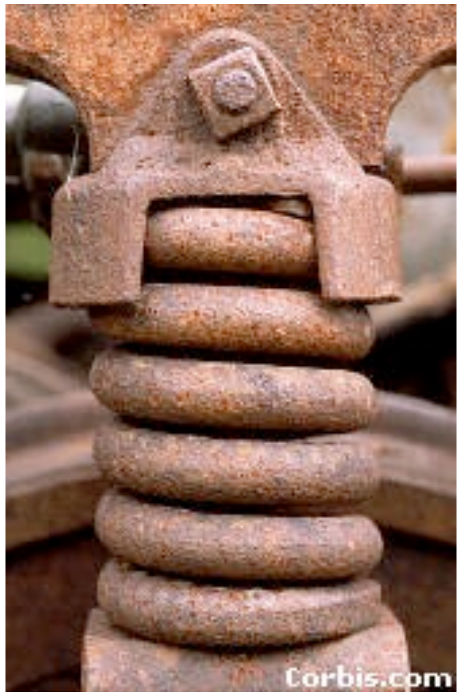
quello azzurro mostra la soluzione numerica dell'equazione differenziale non lineare.



Oscillatori smorzati

Tutte le oscillazioni reali sono soggette a forze di frizione o dissipative. Esse rimuovono energia dal sistema riducendo l'ampiezza





Si consideri una massa m appesa ad una molla con costante elastica k

Forza di richiamo = kx quando m è a distanza x dall'equilibrio

forza viscosa $\propto$ dx/dt

$$F = ma$$

$$-kx - b\frac{dx}{dt} = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = 0$$

dove $\gamma = b/m$ e $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$

Equazione ausiliaria

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = 0$$ dove $\gamma = b/m$ e $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$

Per trovare l'equazione ausiliaria si prova: $x(t) = e^{-\beta t}$

$$\beta^2 - \gamma\beta + \omega_o^2 = 0 \qquad \beta_{1/2} = \frac{\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - 4\omega_0^2}}{2}$$

1) $\gamma > 2\omega_0$ $x(t) = Ae^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{-\frac{\sqrt{\gamma^2-4\omega_0^2}}{2}t} + Be^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{+\frac{\sqrt{\gamma^2-4\omega_0^2}}{2}t}$

2) $\gamma = 2\omega_0$ $x(t) = Ae^{-\frac{\gamma}{2}t} + Bte^{-\frac{\gamma}{2}t}$

3) $\gamma < 2\omega_0$ $x(t) = Ae^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{-i\frac{\sqrt{4\omega_0^2-\gamma^2}}{2}t} + Be^{-\frac{\gamma}{2}t} e^{+i\frac{\sqrt{4\omega_0^2-\gamma^2}}{2}t}$

Le costanti vanno determinate imponendo le condizioni al contorno, ad esempio $x(0)=x_0$ e $v(0)=0$.

$$1)\quad x(t) = e^{-\frac{\gamma}{2}t}\left[\left(\frac{x_0}{2} - \frac{\gamma x_0}{4\omega}\right)e^{-\omega t} + \left(\frac{x_0}{2} + \frac{\gamma x_0}{4\omega}\right)e^{+\omega t}\right]$$

sovrasmorzato

$$2)\quad x(t) = e^{-\frac{\gamma}{2}t}\left[x_0 + \frac{\gamma x_0}{2}t\right]$$

critico

$$3)\quad x(t) = e^{-\frac{\gamma}{2}t}\left[\left(x_0\right)\cos\omega t + \left(\frac{\gamma x_0}{2\omega}\right)\sin\omega t\right]$$

sottosmorzato

$$\text{con}\quad \omega = \frac{\sqrt{4\omega_0^2 - \gamma^2}}{2} = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2}$$

Smorzamento critico

$$\frac{d^2f}{dt^2} + (\omega_o^2 - \frac{\gamma^2}{4})\, f = 0$$

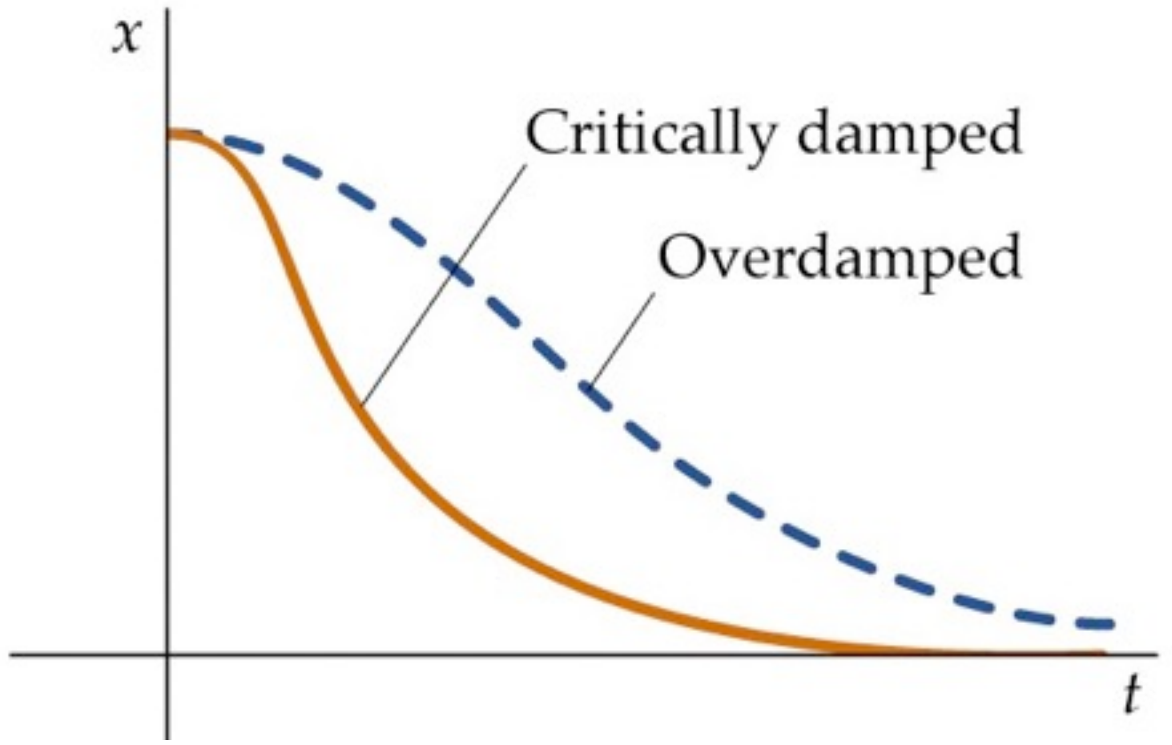
Se $\gamma = 2\omega_o$ la massa ritorna all'equilibrio + velocemente

e $$\frac{d^2f}{dt^2} = 0$$

$$\therefore \quad f = A + Bt$$

$df/dt=B \qquad d^2f/dt^2=0$

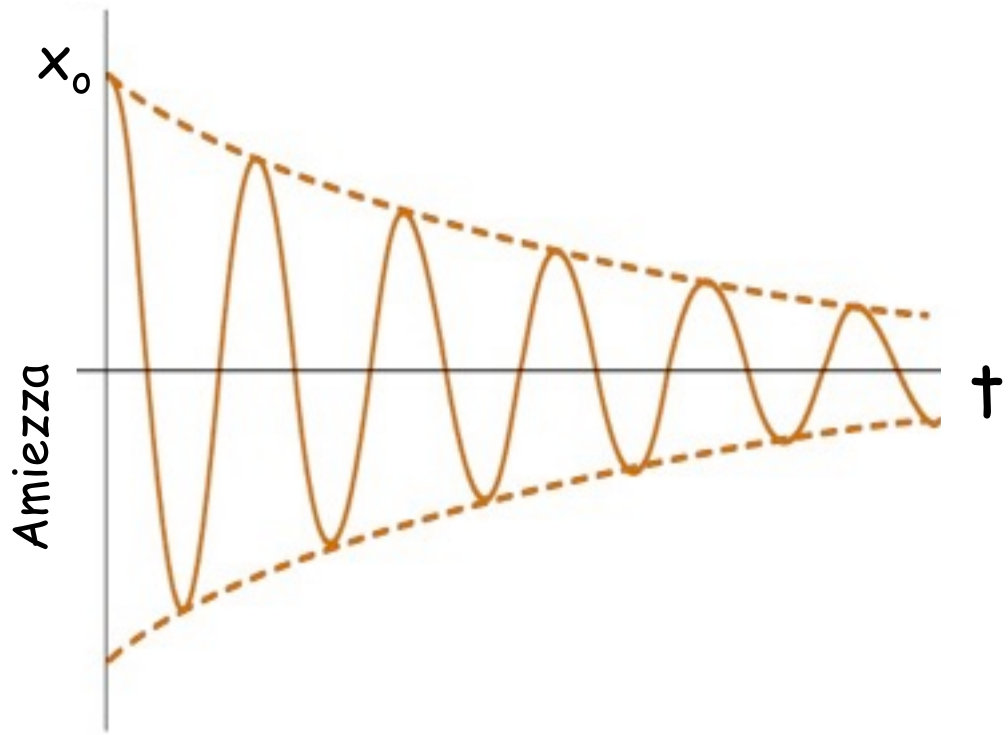
e $$x = e^{\frac{-\gamma t}{2}}\left(A + Bt\right)$$



Energia di un oscillatore smorzato

Generalmente $E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2$ energia E $\propto$ ampiezza A^2

se l'ampiezza decade esponenzialmente lo farà anche l'energia



$$x(t) = x_o\, e^{\frac{-\gamma t}{2}} \cos(\omega t)$$

max spostamento quando cos=1

$$x(t) = x_o\, e^{\frac{-\gamma t}{2}}$$

$$\therefore \quad \boxed{E = \frac{1}{2} m\omega^2 (x_o e^{-\frac{\gamma t}{2}})^2}$$

Fattore di qualità - Q

Un oscillatore smorzato è spesso descritto dal suo fattore di qualità o Q-factor

$$Q = \frac{\omega_o m}{b} = \frac{\omega_o}{\gamma}$$

che è legato alla perdita frazionaria di energia in un ciclo, infatti:

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 (x_o e^{-\frac{\gamma t}{2}})^2$$

$$= E_o\, e^{-\gamma t}$$

$$dE = -\gamma\, E_o\, e^{-\gamma t} dt$$

$$= -\gamma\, E\, dt$$

Q

In un sistema debolmente smorzato l'energia persa per ciclo è piccola

$$\Delta E = -\gamma E T$$

$$dE = \Delta E \qquad e \qquad dt = T$$

$$\frac{|\Delta E|}{E} = \gamma T$$

$$\frac{|\Delta E|}{E} = \frac{\gamma 2\pi}{\omega_o}$$

$$\text{ma} \quad Q = \frac{\omega_o}{\gamma} \quad \text{ie} \quad \gamma = \frac{\omega_o}{Q}$$

$$\boxed{\frac{|\Delta E|}{E} = \frac{2\pi}{Q}}$$

Esempio

Quando la nota C intermedia sul piano ($f=262Hz$) viene suonata, perde metà della sua energia dopo 4s.

(a) qual'è il decadimento temporale ?

(b) qual'è il fattore Q per questa corda ?

(c) qual'è la perdita frazionaria di energia/ciclo?

(a) qual'è il decadimento temporale ?

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2(x_o e^{-\frac{\gamma t}{2}})^2$$

$$= E_o\, e^{-\gamma t}$$

tempo di decadimento

$\tau = 1/\gamma$

$$\therefore \quad E = E_o\, e^{-t/\tau}$$

Quando t=4s, $E = 1/2E_o$

$$\frac{1}{2}E_o = E_o\, e^{-4/\tau}$$

$$2 = e^{4/\tau}$$

$$\ln 2 = \frac{4}{\tau}$$

$$\tau = 5.77$$

tempo di decadimento = 5.77s

(b) qual'è il fattore Q per questa corda ?

$$Q = \frac{\omega_o}{\gamma} \quad e \quad \tau = 1/\gamma$$

$$Q = \omega_o \tau$$

$$= 2\pi f \tau$$

$$= 2\,\pi\,262 \times 5.77$$

$$= 9.5 \times 10^3$$

Fattore Q per la corda del piano = 9.5×10^3 (numero puro)

Q è piuttosto grande, come per i cristalli ed il vetro

(c) qual'è la perdita frazionaria di energia/ciclo?

$$\frac{|\Delta E|}{E} = \gamma\, T$$

$$\frac{|\Delta E|}{E} = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{f\tau}$$

$$= \frac{1}{262 \times 5.77}$$

$$= 6.61 \times 10^{-4}$$

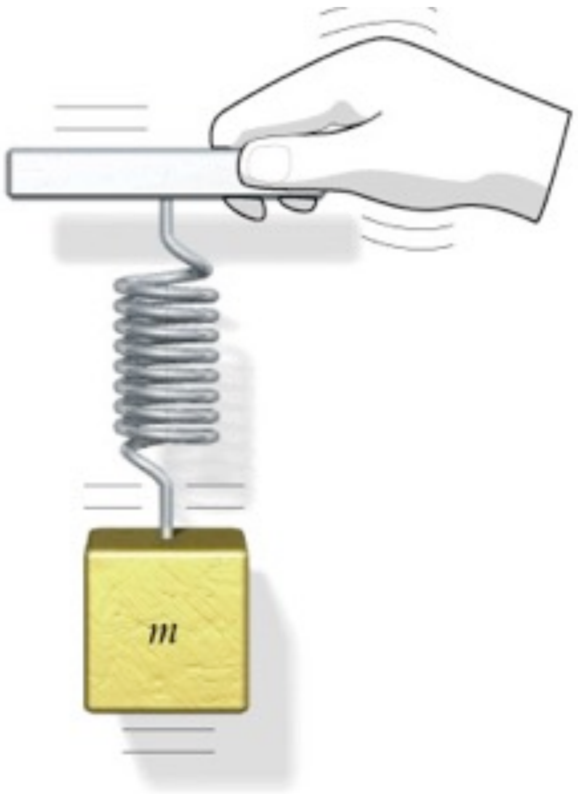
$$\frac{|\Delta E|}{E} = \frac{2\pi}{Q}$$

$$= \frac{2\pi}{9.5 \times 10^{3}}$$

$$= 6.61 \times 10^{-4}$$

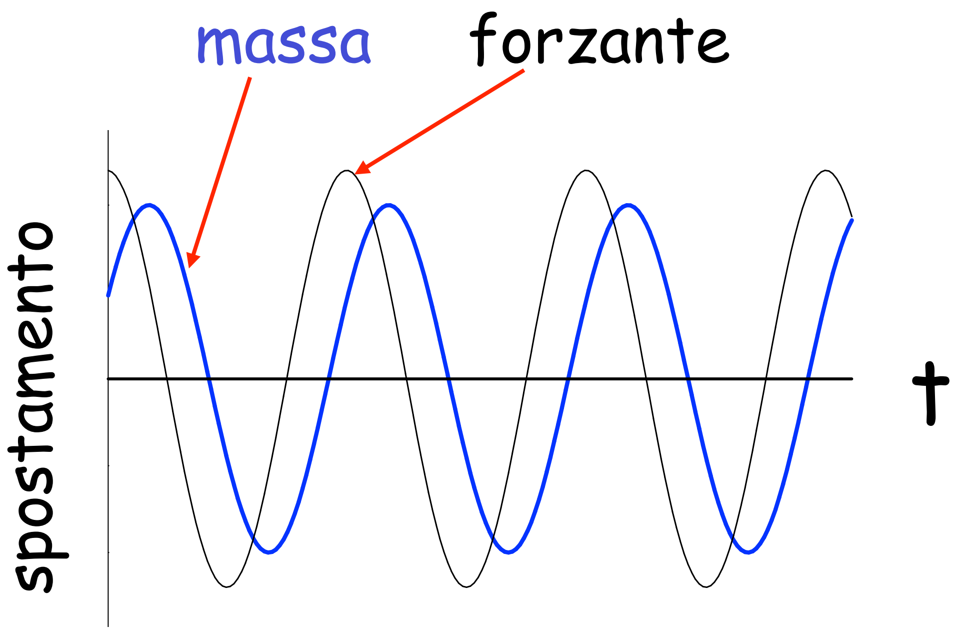
Oscillazioni forzate

Si consideri lo stato stazionario di una massa oscillante su di una molla sotto l'influenza di una forzante.



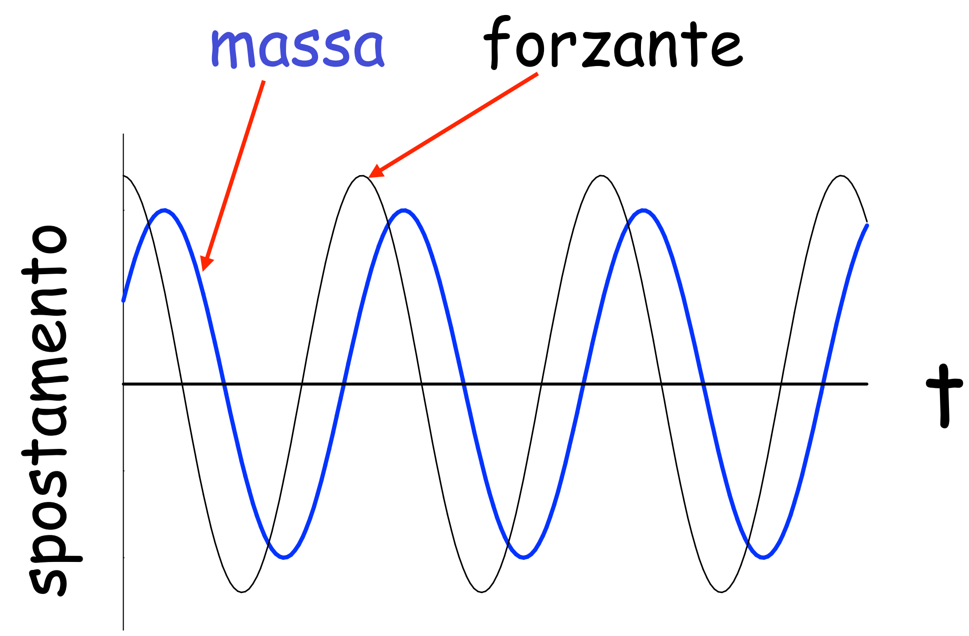
La massa oscilla alla stessa frequenza della forzante con ampiezza costante x_o.

Le oscillazioni sono sfasate, cioè lo spostamento segue la forza.



Forza = $F_o\cos(\omega t)$ ha picchi +ve a t = 0, $2\pi/\omega$, $4\pi/\omega$…………

picchi +ve dello spostamento avvengono a t = Δt, $(2\pi/\omega)+\Delta t$, $(4\pi/\omega)+\Delta t$ …………



$$\therefore \text{lo spostamento } x = x_o\cos(\omega t - \phi) \quad \text{dove} \quad \phi = \omega\Delta t = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$

che descrive lo spostamento con la stessa frequenza della forzante, ampiezza costante ed uno sfasamento φ .

Equazione del moto per un oscillatore forzato

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = \frac{F_o}{m}\cos(\omega t)$$ dove $\gamma = b/m$ e $\omega_0{}^2 = k/m$

Soluzione dell'equazione $x = x_o\cos(\omega t - \phi)$

per determinare x_o e ϕ, bisogna sostituire

$$\frac{dx}{dt} = -\omega x_o \sin(\omega t - \phi)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x_o \cos(\omega t - \phi)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = \frac{F_o}{m}\cos(\omega t)$$

$$-\omega^2 x_o\cos(\omega t - \phi) - \gamma\omega x_o\sin(\omega t - \phi) + \omega_o^2 x_o\cos(\omega t - \phi) = \frac{F_o}{m}\cos(\omega t)$$

$$(\omega_o^2 - \omega^2)x_o\cos(\omega t - \phi) - \gamma\omega x_o\sin(\omega t - \phi) = \frac{F_o}{m}\cos(\omega t)$$

che deve essere vera ad ogni tempo

Per risolvere per x_o e ϕ bisogna considerare 2 situazioni:

1. $(\omega t - \phi) = 0$ $\quad \therefore \sin(\omega t - \phi) = 0$ e $\cos(\omega t) = \cos\phi$

2. $(\omega t - \phi) = \pi/2$ $\quad \therefore \cos(\omega t - \phi) = 0$ e $\cos(\omega t) = \cos(\pi/2 + \phi)$

che porta a due equazioni:

$$(\omega_o^2 - \omega^2)x_o = \frac{F_o}{m}\cos(\phi)$$

$$-\gamma\omega x_o = \frac{F_o}{m}\cos(\frac{\pi}{2} + \phi)$$

ricordando $\cos(\frac{\pi}{2} + \phi) = -\sin\phi$ e $\cos^2 A + \sin^2 A = 1$

Le soluzioni sono:

$$x_o = \frac{F_o / m}{\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2}} \qquad \tan\phi = \frac{\omega\gamma}{(\omega_o^2 - \omega^2)}$$

Risonanza

L'ampiezza e l'energia di un sistema in uno stato stazionario dipende dall'ampiezza e dalla frequenza della forzante.

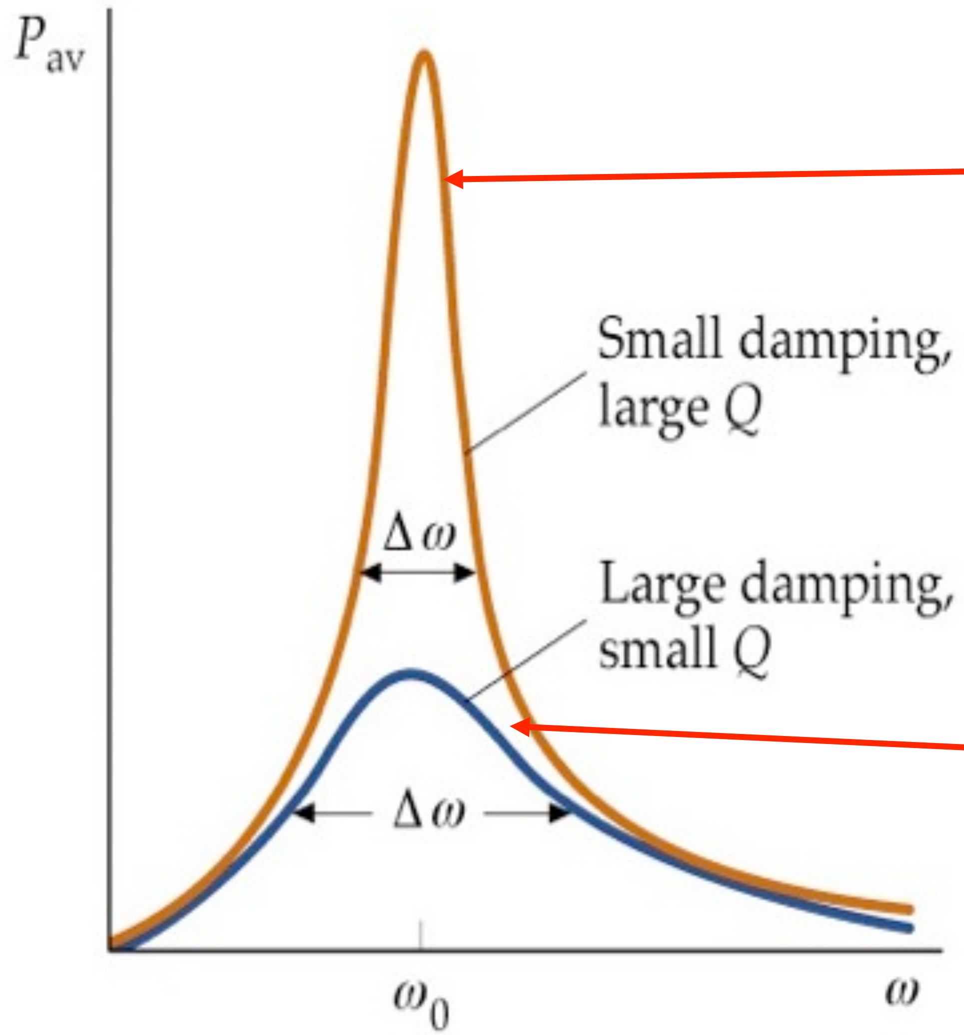
Senza forzante il sistema oscilla alla sua **frequenza naturale** ω_o

Se la frequenza della forzante è circa ω_o l'energia assorbita dall'oscillatore è massima e si avranno grandi ampiezze

Ciò è noto come **risonanza** e la frequenza dell'oscillatore è nota come **frequenza di risonanza**

Tacoma bridge

Il tasso medio di assorbimento di energia T è uguale alla potenza media fornita dalla forzante



Quando lo smorzamento è debole l'oscillatore assorbe più energia dalla forzante.

Il picco di risonanza è più stretto

Smorzamento grande, picco più largo

Smorz. debole $$\frac{\Delta\omega}{\omega_o} = \frac{\Delta f}{f_o} = \frac{1}{Q}$$